

氏 名（本 籍）	宮原 啓 (和歌山県)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学位 授 与 番 号	甲第68号
学位 授 与 日 付	平成26年3月25日
専 攻	システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	酸素同位体比を利用した表層水の低湿度環境下における蒸発率測定法の提案
学位論文審査委員	(主査) 教 授 井伊 博行 (副査) 教 授 平田 健正 教 授 江種 伸之

論文内容の要旨

背景・目的

今後、水資源の枯渇を招く地域が増加すると予測されている。要因には世界人口の増加や産業の発展に伴う水需給の拡大などの人為的要因や地球上の地理的要因、それに気候変動に伴う異常少雨がある。気温上昇により大気中に大量の水蒸気を含むことができるようになるため、地上からの水の蒸発量がさらに増加し、水の利用可能量は減少する可能性が高い。我々は河川水や湖水、地下水を利用し、貯水池やダム湖などによって水資源の確保に努めている。オーストラリアなどの乾燥・半乾燥地域では貯水した水を灌漑用水として利用している。しかし、乾燥・半乾燥地域では地表水の確保は難しく地下水を利用する場合が多い。今後、さらに地下水依存率は上昇すると予測されている。しかし、地下水の供給可能量の把握は他の水源と比較し、決して容易ではない。なぜなら、河川流入量や降水量、河川流出量の観測は可能であるが、地下浸透量は直接観測することは容易ではなく、水収支式の蒸発量を残差項として間接的に求める必要があるからである。地下水の使用量は世界的に多く、地下浸透量を知っておかなければ計画的に地下水を利用することはできない。以上のことから、持続可能な水資源の管理を行っていく上で、今後さらに増加するとされる蒸発による水の損失量と地下水等の水資源の供給可能量を把握することは重要であり、湖や貯水池の蒸発量を測定する意義は大きいのである。

蒸発量の推定にはこれまでに様々な方法が開発されている。例えば、蒸発パンによる直接観測法や気象データを用いた算定法（熱収支法、空気力学的方法、これらを組み合わせた混合法）がある。また近年、水収支の解明において同位体水文学が注目されており、水の安定同位体比と蒸発率の関係式を用いた湖沼、貯水池からの蒸発量の推定手法が検討されている。しかし、これらの方法は日々の気象観測が必要で、さらに蒸発量を求める際の測定が困難なパラメータ（日射量や気化潜熱、水面からの一定の高さの風速や水蒸気圧など時間的・空間的な変動が大きい）や地域による補正値を加える必要があるなど、水の蒸発量を間接的に測定して本来蒸発量がパラメータの変化に応じて変化しているか不確かな問題点がある。そこで本研究では、同位体比と蒸発率の関係を、湿度や気温といった容易に計測できるパラメータのみで表現することが可能かを実験によって確認し、同位体比を用いたより簡易な蒸発率の測定法を開発することを目的とした。ここで、本論文で使用する「蒸発率 (%)」を「蒸発量を蒸発する前の水量で割ったもの」と定義し、「単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量 (‰/‰)」とは「蒸発率が1%進行した時の酸素同位体比の変化量」を意味する。

実験・分析の概要

実際に水を蒸発させ、蒸発に伴う水の酸素同位体比の変化の仕方（プロセス）を調べた。実験は2005年～2013年にかけて環境条件（実験を行う場所、水を入れる容器の容量、気温、湿度、蒸発前の酸素同位体比）を変えて計51回行った。実験場所は、室内では和歌山大学の研究室に設置している低温恒温器内および冷蔵庫内、試料水を保管しているプレハブの冷蔵庫内（5℃設定）、同位体比測定用質量分析装置が設置されている分析室内（19℃設定）の4か所である。屋外では和歌山大学システム工学部B棟の屋上に設置した雨除け付の実験装置内と豪州バララット大学ALCOR試験所の軒下の2か所である。実験には蒸発前の水の酸素同位体比が異なる6地点の水を使用し、酸素同位体比の変化の仕方に違いがみられるのか検証を行った。使用した水の採水地点と酸素同位体比はそれぞれ、①和歌山大学の水道水（-7.3～-8.4‰）、②奈良県の北股川で採水した河川水（-8.1～-8.3‰）、③鹿児島県屋久島で採水した雨水（-5.7～-7.1‰）、④福島県猪苗代の長瀬川で採水した河川水（-11.8‰）、⑤長野県松本トンネルで採水した湧水（-10.7‰）、⑥豪州バララット大学の水道水（-3.5‰）である。これらの水を容量5Lのポリ容器（直径170mm、高さ300mm）と容量2Lのポリ容器（直径126mm、高さ245mm）、容量0.5Lのポリ容器（直径70mm、高さ120mm）にそれぞれ入れて蒸発させた。水を蒸発させている期間中、数日おきに質量を測定し、残量水の採水を行った。実験期間中の気温と湿度は、屋内で行った実験とバララット大学ALCOR試験所の軒下で行った実験では記憶計（屋内：佐藤計量器製作所SK-L200TH II、ALCOR試験所：Jaycar Electronics社DIGITECH QP-6013）を使用し、1時間おきにデータを取得した。和歌山大学システム工学部B棟の屋上で行った実験では和歌山地方気象台で観測された気象データを使用した。水の酸素同位体比の測定は、炭酸ガス平衡法によって前処理を行った後、同位体比測定用質量分析装置（Sercon Geo Wet システム）で測定した。

結果と考察

計51回行った実験のそれぞれの日平均蒸発量、平均気温、平均湿度、平均飽差を求めた。また、蒸発率と酸素同位体比の関係から、単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量を求めた。単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量と蒸発期間中の湿度に負の相関 ($R=-0.6905$) が確認され、この関係についてより詳細に考察を行うことにした。湿度は季節変化や降水により変動し、日本の場合、湿度が上昇する夏期において単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量は低下し、湿度が低下する冬期において上昇する傾向がみられた。しかし、蒸発期間中の湿度の変動が小さい冷蔵庫内の蒸発の場合においても単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量が変化していた。その要因を検証するため、単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量の時系列を蒸発率10%ごと、酸素同位体比5‰ごとにとった。湿度60%以下の低湿度環境では蒸発が進んでも、およそ一定であったが、湿度60%以上の高湿度環境では蒸発が進むにつれて低下していった。ここで、単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量が時間経過により変化する要因が酸素

同位体比の上昇（水蒸気の酸素同位体比と水の酸素同位体比の相互作用）にあると考えた。そこで、次に水から蒸発する水蒸気の酸素同位体比の実験値と理論値を算出し、水の酸素同位体比と水蒸気の酸素同位体比の相互作用について検証した。その結果、湿度60%以下の低湿度環境では大気中の水蒸気（水分子）は少ないため、水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) の影響は小さく、蒸発する酸素同位体は水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) によってのみ決まる。そして、湿度60%以下で且つ気温20~25℃の気象条件下での単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量は0.11~0.18‰/%に定まった。図1に今回の蒸発実験データから作成した低湿度環境における蒸発率測定モデル図を示す。X軸は蒸発に伴う湖水や貯水池の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) の変化量、Y軸は蒸発率を示している。実験結果より単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量が0.11‰/%、0.15‰/%、0.18‰/%の場合のモデル図を示した。今回は比較的湿度の高い日本において実験を行ってきたが、湖や貯水池の蒸発量を測定すべき場所は水不足が問題となっている乾燥地域であり、そのような環境下では湖や貯水池の水面上であっても低湿度である。よって、乾燥地域において「湖水とその地域の降水の酸素同位体比の差」から、湖や貯水池での蒸発による酸素同位体比の変化量(‰)を求め、我々が測定した蒸発実験から得られた単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量0.11~0.18‰/%を使用すれば、温度や湿度データを計算式に組み込まなくても、蒸発率を容易に見積もることができ、測定する際に必要な観測をこれまでの方法と比較して、かなり簡素化することができる。一方、湿度60%以上の高湿度環境では大気中に水蒸気（水分子）が多く存在しており、低湿度環境の場合よりも水蒸気が凝縮する割合は高い。よって、水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) は大気中の水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) の値に左右されやすい。すなわち、湖や貯水池から蒸発する水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) が大気中の水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) よりも大きい場合、水蒸気が凝縮するときに相対的に酸素同位体比の小さい大気中の水蒸気が凝縮することで、水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) は減少する。一方、湖や貯水池から蒸発する水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) が大気中の水蒸気の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vap}}$) よりも小さい場合、蒸発による同位体濃縮に加えて水蒸気が凝縮するときに相対的に酸素同位体比の大きい大気中の水蒸気が凝縮することで、水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) は増加する。そのために高湿度環境下では単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量にばらつきが生じたといえる。しかし、平均湿度60~80%の日本の実際の湖（猪苗代湖、屈斜路湖、摩周湖、倶多楽湖、田沢湖、琵琶湖、池田湖）において、単位蒸発率あたりの酸素同位体比の変化量0.11~0.18‰/%を適用し、蒸発量を試算したところ、他の方法で算出された蒸発量とある程度一致しており、高湿度環境下の湖においても蒸発量を見積もることができた。

このことから、今回提案した「酸素同位体比を用いて湖や貯水池の蒸発量を評価する方法」は、既往研究によるこれまでの測定法よりも測定項目が少なく簡易で、さらに、どの湿度環境下でも適用できる可能性があるため、酸素同位体比を利用した蒸発率の簡易測定法の一般化が期待される。

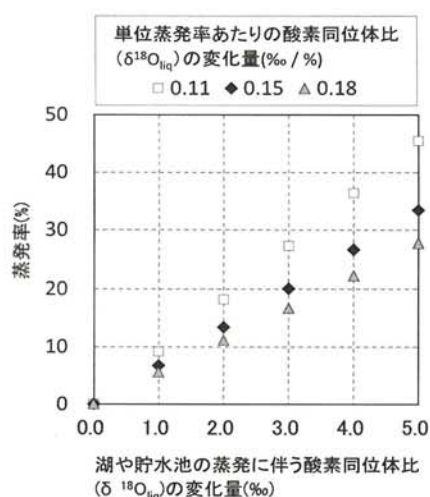


図1 低湿度環境における蒸発率測定モデル図
[蒸発率と蒸発に伴う湖水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) の変化量、単位蒸発率あたりの酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{liq}}$) の変化量の関係]

論文審査の結果の要旨

学位論文の草稿原稿は、タイトル、引用文献の追加などの指摘事項があったが、構成、論旨、内容ともに学位授与に値する内容であると判断された。また、学位に関連する業績では、審査論文3件、海外発表2件あり、十分な成果があり、業績面でも学位授与に値するものと判断された。

学位論文は、同位体比を使った蒸発量の推定方法で、従来に比較して、日々の蒸発量測定や蒸発量に関連する気象観測を必要とせずに、簡易に測定可能な方法について論述したものである。特に、ダム、ため池、灌漑水路、ため池での蒸発量や地下浸透量の推定に役立つもので有効な方法の提案である。

最終試験の結果の要旨

2014年2月6日、10:00から公聴会を開き、論文、研究内容について審査した。軽微（表層水から湖沼水）な修正点を指摘された。また、内容確認のための口頭試問（高湿度環境下での適用名難しい理由など）が行われ、明確な回答が得られ、最終的に審査員全員の合意で、合格と判断された。